

## К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАСПЫЛА

**Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, В.Е. Губин, М.В. Ведяшкин**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*

Выполнены экспериментальные исследования структуры потока водоугольного топлива (ВУТ) в процессе его пневмомеханического распыла в аэродинамическом имитаторе топки энергетического котла. Проанализирован механизм распыла ВУТ в соотношении 50 % уголь и 50 % вода, размер частиц угля 50 мкм и менее при значениях температур 313 и 353 К и давлениях: ВУТ 3 МПа и воздуха 2 МПа. Визуализация структуры факела ВУТ и оценка качества потока выполнены в плоскости перпендикулярно оси факела на трех отрезках. Определены геометрические параметры и скорости капель ВУТ в процессе распыла. Проанализировано изменение критерия  $We$  в зависимости от скорости капель ВУТ и их размера. Установлены характерные зоны факела ВУТ, формирующиеся в процессе распыла. Определены диапазоны диаметров и скоростей капель ВУТ, соответствующих сердцевине потока, средней и внешним зонам факела. Рассчитаны значения  $We$  для соответствующих размеров и скоростей капель ВУТ. Сформулированы условия, характерные для некоторых стадий дробления капель распыляемого ВУТ. Полученные результаты могут быть использованы при математическом и физическом моделировании процесса распыла ВУТ в топках энергетических котлов с целью прогностических оценок аэродинамических характеристик проектируемых и действующих агрегатов.

*Ключевые слова: водоугольное топливо, суспензия, распыление, форсунка, число Вебера.*

### Введение

Ежегодный рост цен на топливно-энергетические ресурсы является причиной создания и развития новых топливных технологий для энергетики и промышленности [1–2]. Альтернативные и возобновляемые источники энергии частично позволяют компенсировать потребность в дешевой и доступной энергии [3], но, как правило, этого недостаточно. Мировые запасы энергетических углей являются предпосылками к разработкам и реализации новых экологически перспективных и энергоэффективных топлив для производства тепловой и электрической энергии [4]. Проведенные ранее исследования [5–9] позволяют сделать вывод, что наиболее перспективным видом топлива для энергетики является водоугольное топливо (ВУТ). В настоящее время известны действующие тепловые электрические станции, использующие в качестве котельно-печного топлива ВУТ [10]. Как правило, ВУТ представляет собой смесь воды и мелкодисперсного угля с добавлением пластификатора или без него [11–14]. Ранее установлено [15–17], что основными параметрами, определяющими ВУТ, являются его реологические свойства (вязкость, плотность и седиментационная устойчивость). Данные характеристики нестабильны и зависят от марки угля, его концентрации в составе ВУТ, способа обработки, а также типа пластифи-

катора [18–19]. Определено, что реологические свойства ВУТ в значительной степени зависят от пористости угольных частиц, что способствует возрастанию влагоемкости угля, в результате чего повышается вязкость ВУТ [20].

Известно, что качество распыла ВУТ существенно образом влияет на эффективность его сжигания [21]. Поэтому более полное раскрытие механизмов дробления капель ВУТ в процессе распыления является актуальной проблемой. В работе [22] представлены результаты исследований распыла ВУТ. Эксперименты выполнены при помощи испытательного стенда. Распыление ВУТ производилось на экран с поддоном. Конфигурация факела распыла определялась следующим образом: факел на определенном расстоянии от форсунки пересекался алюминиевой пластиной. По отпечатку на пластине определялось качество распыла. Авторами изучался механизм дробления капель топлива при его распылении. Также известно, что распыление ВУТ воздухом осуществляется в два этапа: дробление струи ВУТ за счет кинетической энергии распыляющего агента и сил сопротивления, создаваемых окружающей газовой средой [23]. В работе [24] представлены результаты процесса распыления ВУТ форсункой с внутренним смешением. Доказано, что на процесс распыла влияют: геометрические характеристики

форсунки, отношение плотности между жидкостью и распыляющим газом, входное давление, температура и вязкость суспензии, распределение твердых частиц. В [25] представлены результаты исследований поведения водоугольного топлива в условиях типичных для газовых турбин. Авторами [23] представлены результаты исследования физического моделирования разрушения капель ударной волной, также в работе [26] указывается классификация дробления капель как наиболее отвечающая современным требованиям. Особо следует отметить труды [27], посвященные особенностям процессов тепломассопереноса и гидродинамики.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования структуры потока ВУТ в процессе его пневмомеханического распыла и классифицирование этапов дробления капель ВУТ при заданных условиях и параметрах.

### Постановка эксперимента

Экспериментальная установка для исследования процессов дробления капель ВУТ в потоке представлена на рис. 1. Для распыла ВУТ используется пневмомеханическая форсунка 1, расположенная в аэродинамическом имитаторе топки 2. ВУТ подается с помощью мембранного насоса с пневмоприводом серии NDP15 3 из бака запаса ВУТ 4. Распыляющий агент (воздух) нагнетается компрессором Becker 5. Распыленный поток подсвечивается «ножом», создаваемым лазером 6 (Beamtech Vlite-200). Регистрация распыла осуществляется высокоскоростной кросскорреляционной камерой 7. Существует возможность установки камеры в нескольких положениях (А, В, С) для регистрации различных участков факела распыла.

При постановке эксперимента использовался

каменный уголь фракции 50 мкм и менее. ВУТ приготовлено при соотношении компонент 50 % уголь и 50 % вода в смесительной установке. В процессе распыла давления ВУТ и воздуха составляло 3 и 2 МПа соответственно. Термическая подготовка выполнена при помощи электрического нагревателя до значений температур 313 и 353 К. Регистрация структуры потока ВУТ осуществлялась на отрезках А (0–0,1 м), В (0,2–0,4 м), С (0,4–0,6 м) от устройства распыла (диаметр сопла  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м). Стадии дробления капель ВУТ в процессе распыла оценивались в соответствии с [27] по одному из основных параметров – критерию Вебера  $We$ :

$$We = \frac{\rho \cdot D \cdot w^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность ВУТ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $D$  – характерный размер, м;  $w$  – скорость, м/с;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\text{кг/с}^2$ .

Экспериментальные исследования выполнены со следующими допущениями:

- при оценке числа  $We$  не учитывался эффект вращения капель ВУТ в процессе распыла;
- коэффициент поверхностного натяжения ВУТ принимался  $0,06 \text{ кг/с}^2$ ;
- не учитывались внешние факторы – давление и температура внутри аэродинамического имитатора топки;
- влияние конструктивных особенностей форсунки не рассматривались;
- цифровая трассерная визуализация осуществлялась при помощи одной кросскорреляционной камерой.

Полученные результаты (размер капель) при распыле ВУТ обработаны в векторном редакторе. Оценка скорости капель осуществлялась при по-

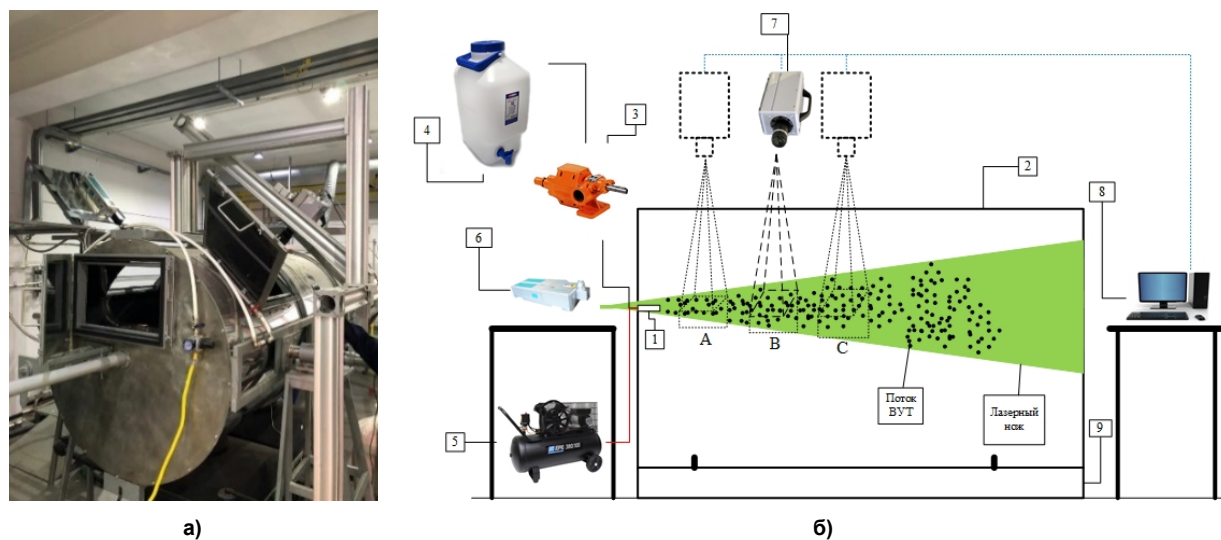


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – общий вид; б – принципиальная модель: 1 – форсунка, 2 – аэродинамический имитатор топки, 3 – мембранный насос с пневмоприводом серии NDP 15, 4 – бак запаса ВУТ, 5 – компрессор Becker, 6 – лазер Beamtech Vlite-200, 7 – высокоскоростная камера, 8 – ПК, 9 – бак сбора отработавшего ВУТ. А, В, С – возможные положения камеры

мощи метода PIV (Particle Image Velocimetry) – метода цифровой трассерной визуализации.

### Результаты и их обсуждения

При определении диаметра капель ВУТ в процессе пневмомеханического распыла выделено несколько характерных диапазонов с соответствующими значениями скоростей. Установлено, что диапазонам скоростей капель 25–29 м/с и 30–35 м/с соответствуют размеры капель диаметром от 500 до 300 мкм и от 300 до 50 мкм. На рис. 2 представлены зависимости, характеризующие изменения чисел  $We$  от скорости капель ВУТ различных диаметров на исследуемых отрезках А, В, С.

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов. Во-первых, изменение числа  $We$  от диаметра капель ВУТ при различных скоростях описывается прямолинейными зависимостями. Во-вторых, с увеличением диаметра капель ВУТ значение  $We$  увеличивается. Полученные зависимости позволяют графически определить значения  $We$  для различных значений скоростей и

диаметров. Следует отметить, что величина температуры (313 и 353 К) распыляемой среды – ВУТ – незначительно влияет на изменение значений чисел  $We$ , таким образом, на рис. 3 представлены результаты, соответствующие температуре ВУТ 313 К. Также следует отметить, что в составе ВУТ не присутствовали пластификаторы – вещества, позволяющие исключить значительно уменьшить эффект расслаивания ВУТ. Их наличие в составе ВУТ значительно увеличит вязкость и, как следствие, изменится коэффициент поверхностного натяжения топлива, который оказывает значительное влияние на величину числа  $We$ . Отдельно следует проанализировать полученные экспериментально кривые, представленные на рис. 3. Для построения зависимостей (рис. 3а, б) использовались следующие экспериментальные данные: размер капель ВУТ и их скорость, при этом каждой точке на характеристике соответствуют самостоятельные значения диаметра и скорости, как представлено в таблице.

На рис. 3а представлены две зависимости, характеризующие изменение числа  $We$  для сформу-

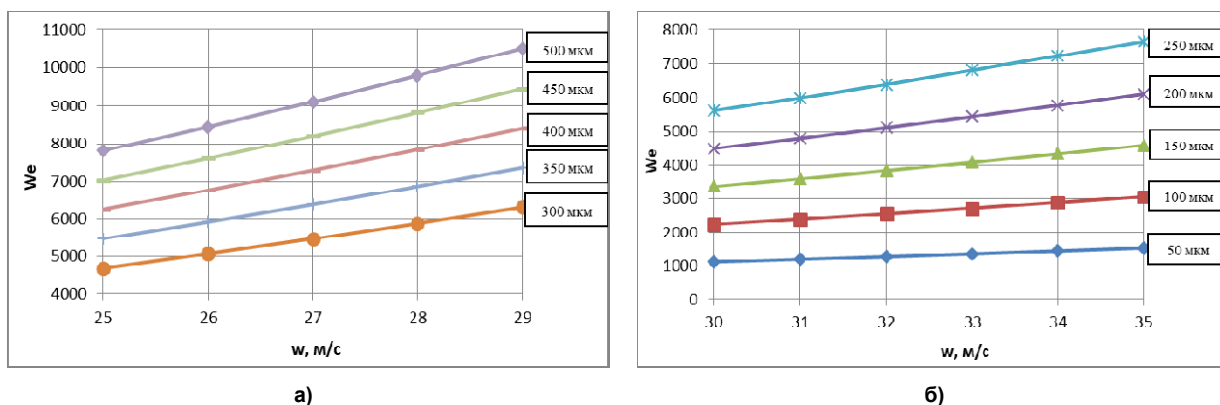


Рис. 2. Зависимость числа  $We$  от скорости капель:  
а – скорость капель от 25 до 29 м/с; б – скорость капель от 30 до 35 м/с

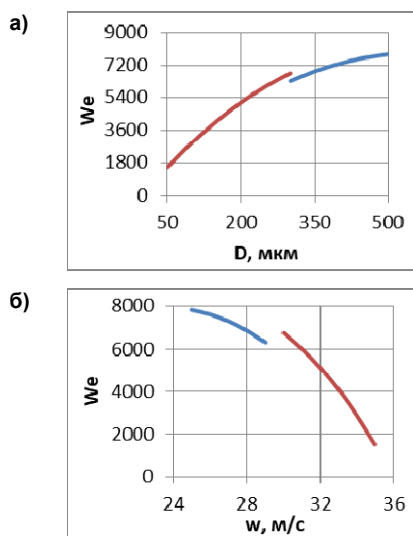


Рис. 3. Изменение числа  $We$

### Экспериментальные и расчетные данные

Диаметр капель ВУТ, мкм	Скорость, м/с	Число $We$
50	35	1531,25
100	34	2890
150	33	4083,75
200	32	5120
250	31	6006,25
300	29	6307,5
350	28	6860
400	27	7290
450	26	7605
500	25	7812,5

лированной задачи. С увеличением диаметра капль распыляемого ВУТ увеличивается значение критерия  $We$ . При этом изменение скорости капль способствует снижению значения числа  $We$  от 1500 до 8000 в рассматриваемом диапазоне скоростей и размеров. Следует отметить, что в установившемся потоке распыляемого ВУТ значительно преобладают капли диаметром в диапазоне от 50 до 300 мкм и скоростями 35–29 м/с. Таким образом, в исследуемой области на отрезках А, В, С (см. рис. 16) значительная доля (более 60 %) капль ВУТ образовались в процессе дробления более крупных. На рис. 3б представлены зависимости изменения  $We$  от скорости капль. Установлено, что с увеличением скорости капль и уменьшении их диаметра, значения числа  $We$  уменьшаются. На рис. 4 представлены материалы визуализации потока ВУТ на отрезке А (см. рис. 16).

Представленные снимки позволяют выделить характерные зоны потока, распыляемого ВУТ. Так, на рис. 4 ярко выражена сердцевина потока,

средняя и внешняя зоны. При помощи векторной обработки полученных снимков факела распыляемого ВУТ определены геометрические параметры капль. Установлено, что для сердцевинной зоны потока характерны капль ВУТ диаметром от 500 до 300 мкм, обладающие скоростями от 25 до 29 м/с. В средней зоне факела преобладают капль размером от 300 до 200 мкм, скорости которых составляют от 29 до 32 м/с. Для внешней зоны, характерны частицы ВУТ размерами 150–50 мкм и менее, скорости которых достигают 35 м/с и более. Следует отметить, что частицы ВУТ размерами 150–50 мкм и менее также присутствуют в сердцевинной зоне потока и средней зоне факела. Их наличие объясняется процессом дробления крупных капль ВУТ. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в процессе распыла ВУТ формируется факел, состоящий из трех характерных зон: в сердцевинной зоне присутствуют крупные капль (500–300 мкм), не исключено и наличие струек ВУТ; средняя зона, состоящая из капль крупного и



Рис. 4. Факел распыляемого ВУТ: 1 – сердцевина потока; 2 – средняя зона; 3 – внешняя зона

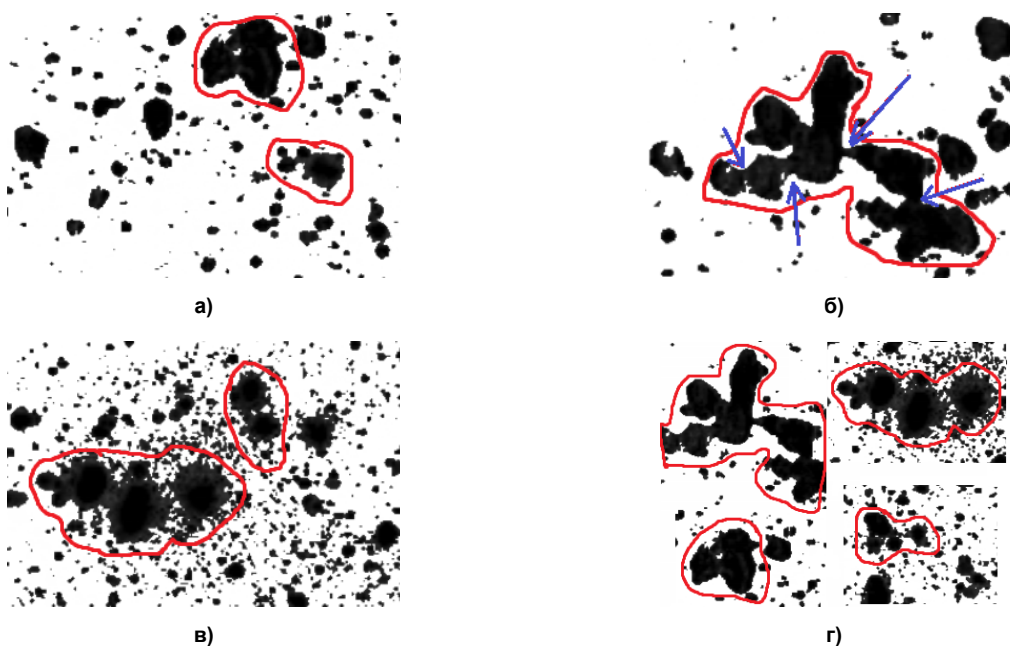


Рис. 5. Механизмы дробления капль ВУТ

среднего размера (300–200 мкм); внешняя зона, состоящая из мелкораспыленных капель (150 мкм и менее).

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований дробления капель ВУТ в процессе пневмомеханического распыла в аэродинамическом имитаторе топki энергетического котла. Механизм дробления капель проанализирован для отрезков *B*, *C* при температуре ВУТ 313 К. На рис. 5а, б зафиксирован момент дробления крупной капли ВУТ за счет силы сопротивления, создаваемой окружающей газовой средой. Размер частиц при этом составляет от 1000 до 500 мкм, что соответствует *We* от 7800 и более.

Наблюдается эффект вибрационного дробления, с характерным эффектом формирования новых капель ВУТ схожих размеров (рис. 5а). Формируются капли размером от 500 до 300 мкм, что соответствует *We* от 7800 до 6300. Процессу дробления крупной, исходной капли, свидетельствует еще не разрушенные связи (рис. 5б, показаны стрелками), наличие которых объясняется вязкостью распыляемого ВУТ. Зарегистрированы капли ВУТ, формирующиеся в процессе дробления по типу «парашют» (рис. 5г), размер которых составляет 500–300 мкм. В данном случае также зафиксирован режим взрывного дробления исходной капли со срывом пограничного слоя. Об этом свидетельствует наличие значительного количества очень мелких капель ВУТ, расположенных на незначительном расстоянии от исходной капли. Размер новых капель при этом изменяется в диапазоне от 250 до 50 мкм и менее. Установлено, что при температурах 313 и 353 К и заданных значениях давлений ВУТ и воздуха на отрезке присутствуют капли значительно меньших размеров по сравнению с представленными на рис. 5. Также следует отметить, что структура потока формируется из капель, размер которых отличается друг от друга незначительно.

#### Заключение

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований структуры потока можно сформулировать следующие значения критерия *We* для некоторых стадий дробления капель распыляемого ВУТ:

- 1) от 1500 до 6300 вибрационное дробление капель ВУТ;
- 2) от 6300 до 7800 дробление капель ВУТ по типу «парашют»;
- 3) от 7800 и более катастрофическое дробление капель ВУТ.

Полученные экспериментальным способом значения *We* для характерных этапов дробления капель ВУТ в процессе пневмомеханического распыла могут быть использованы при математическом и физическом моделировании процесса распыла ВУТ в топках энергетических котлов, что

позволит делать прогностические оценки аэродинамических характеристик проектируемых и действующих агрегатов.

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета

#### Литература

1. Franco, A. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control / A. Franco, A.R. Diaz // *Dipartimento d’Energetica “L. Poggi”, Università di Pisa*. – 2009. – Vol. 34, iss. 3. – P. 348–354. DOI: 10.1016/j.energy.2008.09.012
2. Долгушин, И.А. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС для повышения эффективности и улучшения экологических показателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / И.А. Долгушин. – М., 2014. – 166 с.
3. Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix / C.G. Meza, C. Zuluaga Rodríguez et al. // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 132. – P. 628–648 DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.124
4. Мариничева, О. Уголь возвращается в генерацию / О. Мариничева // *Энергетика и промышленность России*. – 2012. – № 11.
5. Khodakov, G.S. Coal-water Suspensions in Power Engineering / G.S. Khodakov // *Thermal Engineering*. – 2007. – Vol. 54, no. 1. – P. 36–47. DOI: 10.1134/S0040601507010077
6. Саламатин, А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России / А.Г. Саламатин // *Уголь*. – 2000. – № 3. – С. 10–15.
7. Nyashina, G.S. The influence of liquid plant additives on the anthropogenic gas emissions from the combustion of coal-water slurries / G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 242. – P. 31–41. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.072
8. Долинский, А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А.А. Долинский, А.А. Халатов // *Промышленная теплотехника*. – 2007. – Т. 29, № 5. – С. 70–79.
9. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, С.И. Лазарев, Д.А. Лапин // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 7. – С. 25–29. DOI: 10.1134/S0040363614070066
10. Осинцев, К.В. Организация факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергокотлов / К.В. Осинцев // *VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива»*. – 2012. – С. 72.1–72.8.
11. Мингалеева, Г.Р. Определение оптимальных характеристик водоугольного топлива по условиям транспортирования и газификации / Г.Р. Мингалеева // *VIII Всероссийская конференция*

с международным участием «Горение твердого топлива». – 2012. – С. 65.1–65.4.

12. Баранова, М.П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма / М.П. Баранова // Труды КГТУ. – 2006. – № 2–3. – С. 143–147.

13. Тарабанько, В.Е. Природа стабилизации водоугольных топливных суспензий / В.Е. Тарабанько, М.П. Баранова // Техническая химия. От теории к практике: сб. науч. тр. – Пермь, 2008. – С. 299–304.

14. Белецкий, В.С. К вопросу регулирования электрокинетических свойств углей в суспензиях / В.С. Белецкий, П.В. Сергеев, М.К. Борейко // Химия твердого топлива. – 1990. – № 5. – С. 73–75.

15. Coal slurry / T. Ukigai et al. // Chem. Lett. – 1995. – P. 371–374.

16. Research of Mechanical Treatment Influence on Rheological Properties of Coal-Water Fuel Based on Low-Grade 3B Coal / A.A. Tolokolnikov, S.A. Yankovsky, V.E. Gubin et al. // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 91, 01012. DOI: 10.1051/mateconf/20179101012

17. Effects of fractal surface on rheological behavior and combustion kinetics of modified brown coal water slurries / Z. Gao, S. Zhu, M. Zheng et al. // International Journal of Coal Science and Technology. – 2015. – Vol. 2, iss. 3. – P. 211–222. DOI: 10.1007/s40789-015-0075-0

18. Сенчулова, Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко, В.И. Федяев и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 4. – С. 37–40.

19. Результаты исследований процессов распыления и сжигания суспензионного угольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко и др. // Современная наука. – 2012. – № 1 (9). – С. 89–96.

20. Сенчулова, Ю.А. Механизм распыления водоугольного топлива / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых (8–11 декабря 2005 г.): в 7 ч. / Новосибирский государственный технический университет. – 2006. – Ч. 3. – С. 84–86.

21. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer / S.G. Daviault, O.B. Ramadan, E.A. Matida et al. // Fuel. – 2012. – Vol. 98. – P. 183–193. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.042

22. Ma, X. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer / X. Ma, Y. Duan, M. Liu // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2013. – Vol. 46. – P. 131–138. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.12.003

23. Бойко, В.М. Экспериментальное исследование двух типов срывного разрушения капли в потоке за ударной волной / В.М. Бойко, С.В. Поплавский // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 76–82.

24. Gasification of high viscous slurry R&D on atomization and numerical simulation / T. Jakobs, N. Djordjevic, S. Fleck et al. // Applied Energy. – 2012. – Vol. 93. – P. 449–456. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.026

25. Smith, C.F. The influence of fluid physical properties on coal-water slurry atomization / C.F. Smith, P.E. Sojka, J.M. Thames // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1990. – Vol. 112 (1). – P. 15–20. DOI: 10.1115/1.2906470

26. Pilch, M. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop. / M. Pilch, C.A. Erdman // Int. J. Multiphase Flow. – 1987. – Vol. 13. – P. 741–757. DOI: 10.1016/0301-9322(87)90063-2

27. Галустов, В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике / В.С. Галустов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

**Гвоздяков Дмитрий Васильевич**, канд. техн. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; dim2003@tpu.ru.

**Зенков Андрей Викторович**, ассистент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; avz41@tpu.ru.

**Губин Владимир Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; gubin@tpu.ru.

**Ведяшкин Максим Викторович**, канд. техн. наук, доцент Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; vedyashkin@tpu.ru.

Поступила в редакцию 20 ноября 2018 г.



## ON THE STUDY OF COAL-WATER FUEL FLOW STRUCTURE DURING ITS PNEUMATIC-MECHANICAL ATOMIZATION

D.V. Gvozdyakov, dim2003@tpu.ru,

A.V. Zenkov, avz41@tpu.ru,

V.E. Gubin, gubin@tpu.ru,

M.V. Vedyashkin, gubin@tpu.ru

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

The paper describes the experimental studies of the structure of coal-water fuel (CWF) flow during its pneumatic spraying in the aerodynamic simulator of the energy boiler furnace. It analyses the 50 % coal and 50 % water CWF spraying mechanism. Parameters: coal particle size was 50 microns or less; temperature was 313 K, 353 K; pressure of CWF was 3 MPa; and pressure of air was 2 MPa. The visualization of CWF torch structure and the assessment of the flow quality were made in the plane perpendicular to the axis of the spray cone in three positions. Geometrical parameters and velocities of CWF droplets during spraying were determined. The change of the We criterion was analyzed depending on CWF drops velocity and their size. The characteristic zones of CWF spray cone, which are generated during spraying, were established. The ranges of diameters and velocities of CWF droplets corresponding to the core of the flow, the middle and outer zones of the spray cone were determined. The We values were calculated for the corresponding CWF droplets sizes and velocities. The conditions typical for some stages of droplets crushing of sprayed CWF were described. The research outcomes can be used for the mathematical and physical simulations of CWF spraying in the furnaces of power boilers to estimate the forecast aerodynamic characteristics of the designed and existing units.

*Keywords: coal-water fuel, suspension, spraying, nozzle, Weber number.*

The work was performed as part of the program to improve the competitiveness of Tomsk Polytechnic University.

### References

1. Franco A., Diaz A.R. The Future Challenges for “Clean Coal Technologies”: Joining Efficiency Increase and Emission Control. *Dipartimento d’Energetica “L. Poggi”, Università di Pisa*, 2009, vol. 34, iss. 3, pp. 348–354. DOI: 10.1016/j.energy.2008.09.012
2. Dolgushin I.A. *Issledovaniye i sovershenstvovaniye skhemy T-ES s kotlom TSKS dlya povysheniya effektivnosti i uluchsheniya ekologicheskikh pokazateley: dis. kand. tekhn. nauk* [Research and Improvement of the Scheme of Thermal Power Plants with a Boiler CCS to Improve Efficiency and Improve Environmental Performance. Cand. Sci. Diss.]. Moscow, 2014. 166 p.
3. Meza C.G., Zuluaga Rodríguez C. et al. Toward a 100 % Renewable Island: A Case Study of Ometepe's Energy Mix. *Renewable Energy*, 2019, vol. 132, pp. 628–648. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.124
4. Marinicheva O. [Coal Returns to Generation]. *Energetika i promyshlennost' Rossii* [Energy and Industry of Russia], 2012, no. 11. (in Russ.)
5. Khodakov G.S. Coal-Water Suspensions in Power Engineering. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 36–47. DOI: 10.1134/S0040601507010077
6. Salamatin A.G. [On the State and Prospects of Using Coal-Water Fuel in Russia]. *Ugol' [Coal]*, 2000, no. 3, pp. 10–15. (in Russ.)
7. Nyashina G.S., Strizhak P.A. The Influence of Liquid Carbon Dioxide Emissions from the Combustion of Coal-Water Slurries. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 242, pp. 31–41. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.072
8. Dolinsky A.A., Khalatov A.A. [Hydrocarbon Fuel: Prospects for Use in Power Engineering and the Housing and Utilities Sector]. *Prom. Teplotekhnika* [Prom. Heat Engineering], 2007, vol. 29, no. 5, pp. 70–79. (in Russ.)
9. Maltsev L.I., Kravchenko I.V., Lazarev S.I., Lapin D.A. [Combustion of Coal in the form of a Coal-Water Slurry in Low-Capacity Boilers]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2014, no. 7, pp. 25–29. DOI: 10.1134 / S0040363614070066. (in Russ.)
10. Osintsev K.V. [The Organization of the Flaring of Coal-Water Suspensions in the Furnaces of Energy Boilers]. *VIII Vserossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem “Goreniye tverdogo topliva”* [VIII All-Russian Conference with International Participation “Solid Fuel Combustion”], 2012, pp. 72.1–72.8. (in Russ.)
11. Mingaleeva G.R. [Determination of the Optimal Characteristics of Coal-Water Fuel under the Terms of Transportation and Gasification]. *VIII Vserossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem “Goreniye*

*tverdogo topliva*” [VIII All-Russian Conference with International Participation “Solid Fuel Combustion”], 2012, pp. 65.1–65.4. (in Russ.)

12. Baranova M.P. [Influence of Plasticizing Additives on the Rheological Characteristics of Coal-Water Slurries from Coal of Varying Degrees of Metamorphism]. *Trudy KGTU* [Proc. of KSTU], 2006, no. 2–3, pp. 143–147. (in Russ.)

13. Tarabanko V.E., Baranova M.P. [Nature of Stabilization of Coal-Water Fuel Suspensions]. *Tekhnicheskaya khimiya. Ot teorii k praktike: sb. nauch. tr.* [Technical Chemistry. From Theory to Practice: Col. of Scientific Proc.], Perm, 2008, pp. 299–304. (in Russ.)

14. Beletsky V.S., Sergeev P.V., Boreyko M.K. [On the Regulation of the Electrokinetic Properties of Coal in Suspensions]. *Khimiya tverdogo topliva* [Chemistry of Solid Fuels], 1990, no. 5, pp. 73–75. (in Russ.)

15. Ukigai T. et al. Coal Slurry. *Chem. Lett*, 1995, pp. 371–374.

16. Tolokolnikov A.A., Yankovsky S.A., Gubin V.E., Zenkov A.V., Zaitsev A.S. Research of Mechanical Treatment Influence on Rheological Properties of Coal-Water Fuel Based on Low-Grade 3B Coal. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 91, 01012. DOI: 10.1051/mateconf/20179101012

17. Gao Z., Zhu S., Zheng M., Wu Z., Lü H., Liu W. Effects of Fractal Surface on Rheological Behavior and Combustion Kinetics of Modified Brown Coal Water Slurries. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2015, vol. 2, iss. 3, pp. 211–222. DOI: 10.1007/s40789-015-0075-0

18. Senchurova Yu.A., Murko V.I., Fedyayev V.I., Dziuba D.A., Puzyrev E.M. [Research Results of Spraying of Water Coal Fuel by Pneumo-Mechanical Nozzles]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of Tomsk Polytechnic University], 2008, vol. 312, no. 4, pp. 37–40. (in Russ.)

19. Murko V.I., Fedyayev V.I., Karpenok V.I. et al. [The Results of Studies of the Processes of Spraying and Burning Coal Suspension Fuel]. *Sovremennaya nauka* [Modern Science], 2012, no. 1 (9), pp. 89–96. (in Russ.)

20. Senchurova Yu.A., Murko V.I. [The Mechanism of Spraying Water Coal Fuel]. *Tekhnologii. Innovatsii: materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh (8–11 dekabrya 2005 g.): Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet* [Science. Technology. Innovations: Materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Scientists (December 8–11, 2005): Novosibirsk State Technical University], 2006, part 3, pp. 84–86. (in Russ.)

21. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A., Hughes P.M., Hughes R. Atomization of the Twin Fluid Atomizer. *Fuel*, 2012, vol. 98, pp. 183–193. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.02.042

22. Ma X., Duan Y., Liu M. Atomization of Petroleum-Coke Sludge Slurry Using Effervescent Atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, vol. 46, pp. 131–138. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.12.003

23. Boyko V.M., Poplavsky S.V. [Experimental Study of Two Types of Disruptive Destruction of a Drop in a Stream Behind a Shock Wave]. *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of Combustion and Explosion], 2012, vol. 48, no. 4, pp. 76–82. (in Russ.)

24. Jakobs T., Djordjevic N., Fleck S. et al. Gasification of High Viscous Slurry R & D on Atomization and Numerical Simulation. *Applied Energy*, 2012, vol. 93, pp. 449–456. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.026

25. Smith C.F., Sojka P.E., Thames J.M. Water-Free-Fluid-Resistance Slurry Atomization. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1990, vol. 112 (1), pp. 15–20. DOI: 10.1115/1.2906470

26. Pilch M., Erdman C.A. Accuracy of the Acceleration-Induced Breakup of Liquid Drop. *Int. J. Multiphase Flow*, 1987, vol. 13, pp. 741–757. DOI: 10.1016/0301-9322(87)90063-2

27. Galustov V.S. *Pryamotochnyye raspylitel'nyye apparaty v teploenergetike* [Direct-Flow Spray Devices in Power System]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 240 p.

*Received 20 November 2018*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла / Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, В.Е. Губин, М.В. Ведяшкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 5–12. DOI: 10.14529/power180401

### FOR CITATION

Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. On the Study of Coal-Water Fuel Flow Structure during Its Pneumatic-Mechanical Atomization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 5–12. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180401